

(Украина, Харьков, НТУ «Харьковский политехнический институт»)

Введение. Схематически устройство линейного импульсного электродвигателя (ЛИЭД) представлено на рис. 1, а более полно описано в работах [1, 2].

Рис. 1. Электросиловая схема ЛИЭД для определения времени действия ударного импульса

Под их воздействием якорь перемещается вниз со скоростью v_a и через опорную плиту 3 передает грунту 4 импульс силы, а реактор, усиленный инерционной массой 5, отскакивает вверх со скоростью v_r .

В результате в земной коре возникают слабые сейсмических колебания, отраженное эхо которых используется при поиске полезных ископаемых.

Постановка задач исследования. Анализ статических электромагнитных сил и полей в ЛИЭД проведен в работах [1, 2], математическая модель импульсного режима ЛИЭД, сопровождающегося совокупностью электромагнитных, механических, энергетических и тепловых процессов, в общем плане представлялась в работе [3], а в [4] уже осуществлен ее расчет. Все это позволяет перейти к анализу совокупности указанных его процессов и соответствующих параметров. Данная работа является очередным этапом в проводимом цикле исследований ЛИЭД [1-5] и ее **целью** является анализ влияния механических параметров ЛИЭД на эффективность его работы как ударного источника сейсмических колебаний.

Математическая модель. Для адекватного восприятия решаемой задачи приведем основные уравнения, составляющие математическую модель ЛИЭД при его работе в ударном режиме, и представим его основные влияющие параметры.

Уравнение электрического равновесия для электрической цепи ЛИЭД имеет вид:

$$\frac{d\Psi(\zeta, i_s)}{dt} + (R_r(\theta) + R_a(\theta) + R_0) \cdot i_s(t) + L_0 \frac{di_s(t)}{dt} + \frac{1}{C_E} \int_0^t i_s(t) dt = U_{Co}, \quad (1)$$

где Ψ – результирующее магнитное потокоцепление (МПС) обмоток; $z(t)$ – взаимное аксиальное смещение реактора и якоря; $R_r(q)$ и $R_a(q)$ – сопротивления обмоток реактора и якоря, являющиеся функциями их температуры q ; R_0 и L_0 – сопротивление и индуктивность подводящих кабелей;

U_{Co} – начальное значение напряжения конденсатора; t – время.

При итерационном расчете переходного процесса двухпараметрическая функция МПС и ее частные производные определялись на основе локальных аппроксимаций заранее подготовленной численно-полевыми расчетами табличной функции $\Psi(z, i_s)$ кубическими полиномами по каждому из аргументов, что детально представлено в [5].

В уравнениях механической части математической модели ЛИЭД в рабочем интервале времени учитывались силы, показанные на рис. 1. Основной является упоминавшаяся уже движущая сила $F_{em}(z, i_s)$, которая, как и МПС, является двухпараметрической функцией и готовилась также численно-полевыми расчетами [1] при весьма большом количестве соотношений z и i_s .

На реактор и якорь действуют также силы их инерции $F_{mr} = m_r a_r$ и $F_{ma} = m_a a_a$, а также их весовые силы $P_r = m_r g_{gr}$ и $P_a = m_a g_{gr}$, где m_r , m_a – полные массы реактора и якоря с учетом всех присоединенных элементов их конструкций; a_r , a_a – ускорение движения реактора и якоря; g_{gr} – гравитационная постоянная.

К важнейшим силам относится еще сила реакции грунта F_{gr} . Для обеспечения расчетных условий ЛИЭД был принят ряд вариантов зависимости силы $F_{gr}(d_{za})$ от осевого смещения якоря d_{za} , которое одновременно является заглублением опорной плиты в грунт (рис. 1). В исходном положении $d_{za} = 0$, а при ударном режиме работы имеет место максимальная деформация грунта d_{zam} (по опытным данным – порядка 10 мм). При этом F_{gr} достигает максимального значения F_{grm} , которое задается на основе тестовых расчетов ЛИЭД.

Гипотетические расчетные варианты реакции грунта представлены на рис.2. Вариант 0 на рис.2, а – абсолютно жесткий грунт без деформации, здесь же вариант 1 – линейная зависимость $F_{gr}(d_{za})$ при прямом (удар) и обратном (отскок) ходах якоря; вариант 2 на рис.2, б – линейная зависимость при прямом

и параболическая – при обратном ходах; вариант 3 на рис.2, в – параболические зависимости при прямом и обратном ходах. В вариантах 1, 2 и 3 при обратном ходе в грунте остается остаточная деформация d_{zao} .

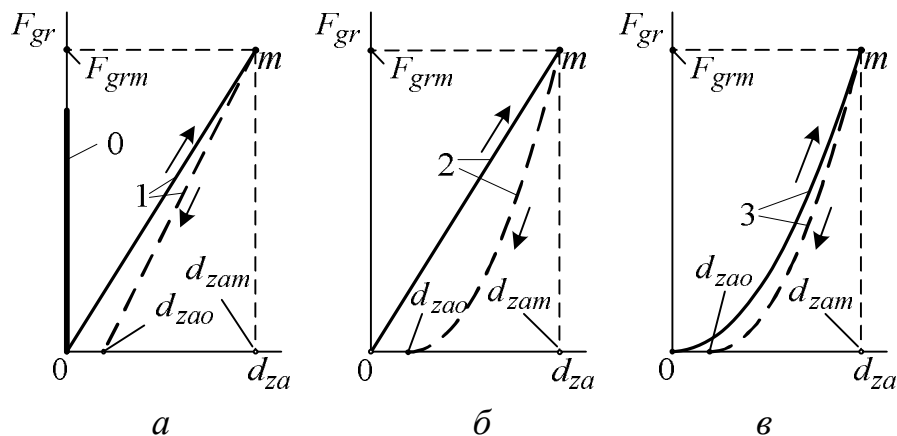


Рис. 2. Варианты функции упругой реакции грунта

С учетом указанных сил (другие силы по сравнению с ними пренебрежимо малы [4]) для интервала времени, соответствующего рабочему ходу, получаются ускорения движения реактора и якоря:

$$a_r = F_{em} / m_r - g_{gr}; \quad a_a = (F_{em} - F_{gr}) / m_a + g_{gr}. \quad (2)$$

При достижении условия $a_r > 0$ с момента времени t_r начинает движение реактор, при $a_a > 0$ с момента времени t_a движется якорь. Их скорости и собственные смещения в указанных на рис. 1 направлениях:

$$v_r = \int_{t_r}^t a_r dt; \quad v_a = \int_{t_a}^t a_a dt; \quad d_{zr} = \int_{t_r}^t v_r dt; \quad d_{za} = \int_{t_a}^t v_a dt. \quad (3)$$

Тогда определяется и взаимное смещение реактора и якоря $x = d_{zr} + d_{za} + d_{zo}$, куда входит важная величина d_{zo} (рис.1) – начальное смещение реактора из положения «нейтрали». В этом положении, когда середина нижнего паза сердечника реактора совпадает с серединой нижнего зубца сердечника якоря, принято, что $x = 0$ и предполагается максимальное значение силы F_{em} [1].

Расчетный анализ. Представленная система уравнений – математическая модель рабочего импульса ЛИЭД, укомплектованная еще уравнениями нагрева обмоток и другими важными соотношениями и условиями [4], была решена численно методом Рунге-Кутты IV порядка по составленной программе на ЭВМ.

Для общего представления о конструкции ЛИЭД (рис. 1) упомянем следующие его параметры: зазор между сердечниками реактора и якоря – 2 мм; диаметр по средней линии зазора – 416 мм; длина сердечников – 533 мм; на паз

приходится МДС $F_n = i_s N_n / a$, где $N_n = 14$ – число витков в пазу, $a = 3$ – число параллельных ветвей обмоток; размеры паза 55×23 мм²; начальное напряжение конденсатора $U_{Co} = 1200$ В.

Пример графиков ряда функций, характеризующих протекание переходного процесса, дан на рис. 3 для конкретного сочетания параметров, из которых упомянем следующие: $m_a = 750$ кг; $m_r = 1500$ кг; $d_{zo} = -12$ мм; реакция грунта по варианту 2 (рис.2, б).

Функции представлены в безразмерной форме, а для общей числовой оценки ударного рабочего режима ЛИЭД укажем максимумы некоторых из них: ток – $I_{smax} = 20,2$ кА, сила $F_{emm} = 1013$ кН, сила $F_{grm} = 1699$ кН, скорости реактора и якоря $v_{rm} = 4,28$ м/с и $v_{am} = 2,65$ м/с; смещение якоря – $d_{zam} = 15,7$ мм, а смещение реактора еще продолжается.

Отметим, что полученные электросиловые параметры рабочего ударного режима ЛИЭД по значениям и характеру изменения достаточно близки к соответствующим экспериментальным данным, измеренным на натурном образце ЛИЭД.

При оценке эффективности работы ЛИЭД за основу принимаются вырабатываемый им импульс силы и импульс силы воздействия на грунт

$$S_{em} = \int_0^{t_{ime}} F_{em} dt; \quad S_{gr} = \int_0^{t_{img+}} F_{gr} dt, \quad (4)$$

где t_{ime} – время действия силы F_{em} ; t_{img+} – время действия силы F_{gr} до того момента, пока якорь еще движется в грунт (т.е. на рис. 3 пока $v_a > 0$).

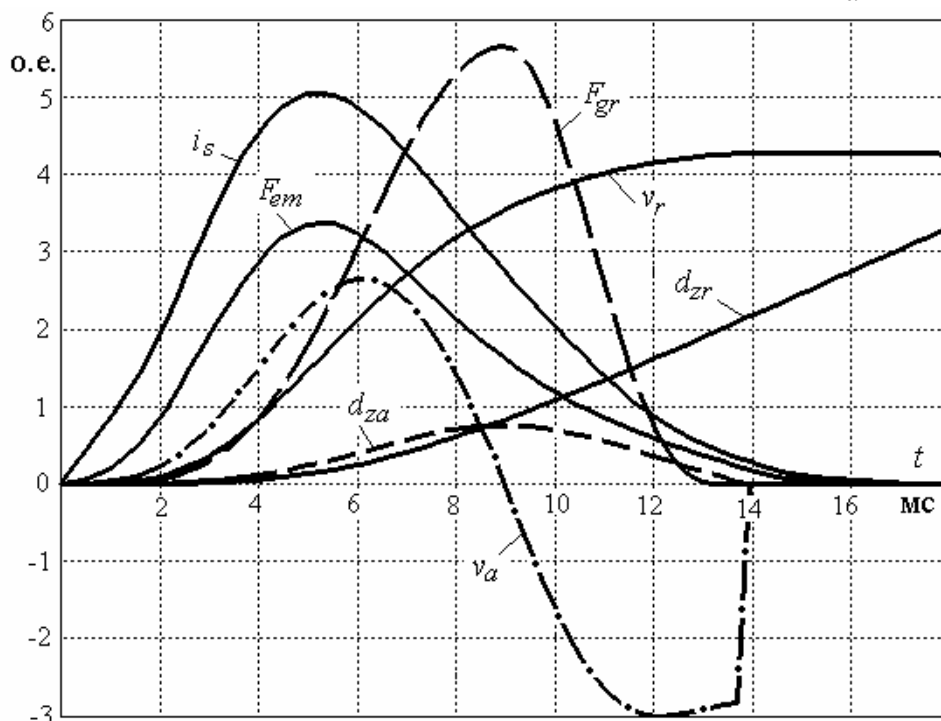


Рис.3. Временные функции величин, характеризующих работу ЛИЭД

Сравнение параметров ЛИЭД при указанных на рис. 2 вариантах реакции грунта дано в таблице, где, кроме уже представленных величин, даны t_{imi} – длительность импульса тока; t_{img} – полная длительность импульса силы F_{gr} . Обратим внимание, что величины I_{smax} , t_{imi} , F_{emm} , t_{ime} и S_{em} , вырабатываемые ЛИЭД, зависят от варианта реакции грунта незначительно, а вот величины F_{grm} , t_{img} и S_{gr} , характеризующие полезное воздействие на грунт, зависят существенно.

Сравнение данных ЛИЭД при разных реакциях грунта
($m_a=750$ кг, $m_r=750$ кг, $d_{zo}=-12$ мм)

Реакция грунта	I_{smax} , кА	t_{imi} , мс	F_{emm} , кН	t_{ime} , мс	S_{em} , Н·с	F_{grm} , кН	t_{img} , мс	S_{gr} , Н·с
0	22,2	12,4	1122	11,8	6889	1129	11,9	6993
1	20,2	13,9	1013	13,3	6634	1699	9,7	5520
2	20,2	13,7	1013	13,1	6606	1699	9,4	5520
3	19,9	14,1	994	13,5	6649	2549	6,8	4890

Варьирование массами реактора и якоря проведено при реакции грунта по варианту 2 и фиксированном значении $d_{zo} = -12$ мм, а результаты представлены на рис. 4, а. Здесь условное значение $m_r = \infty$ соответствовало неподвижному реактору (без отдачи). Очевидно, что с увеличением m_a импульс S_{em} несколько понижается, а вот импульс S_{gr} существенно увеличивается, приближаясь к S_{em} , а с увеличением m_r и вырабатываемый S_{em} , и полезный S_{gr} импульсы возрастают, приближаясь к пределу своих значений при $m_r = \infty$.

При некоторых средних значениях $m_a = 750$ кг и $m_r = 1500$ кг и той же реакции грунта были проведены расчеты при варьировании начальным смещением реактора из положения нейтралы d_{zo} (отрицательные значения указывают на смещение против дальнейшего движения). Результаты расчета на рис. 4, б показывают зависимости от d_{zo} максимальных значений сил ЛИЭД F_{emm} и реакции грунта F_{grm} , а также вырабатываемого S_{em} , и полезного S_{gr} импульсов сил. Очевиден максимальный эффект работы ЛИЭД по величине S_{gr} в диапазоне d_{zo} , составляющем 9–12 мм.

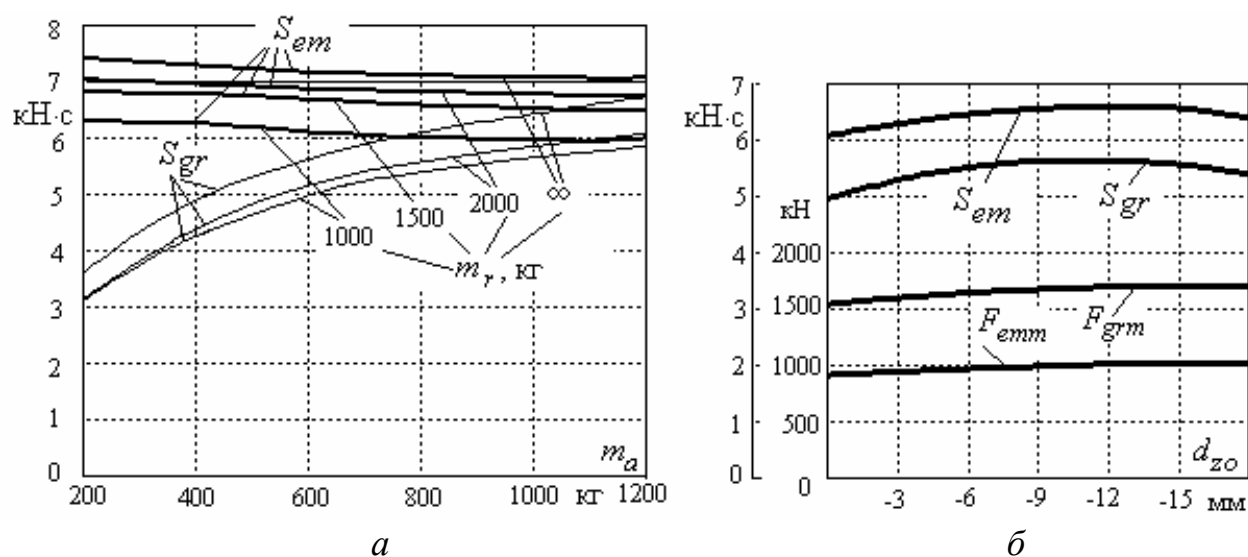


Рис. 4. Сравнение эффективности ЛИЭД при варьировании m_a , m_r и d_{zo}

Выводы. Проведенные исследования показывают, что разработанная методика расчета ударного рабочего режима ЛИЭД позволяет проводить количественную оценку эффективности его работы при варьировании его механическими параметрами и параметрами грунта. Этим проявляется, что наибольшей эффективности можно достичь при конкретных соотношениях таких параметров ЛИЭД, как массы якоря и реактора, а также начальное их взаимное расположение.

Список литературы

1. Милых В.И. Силовые взаимодействия в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №6. – С.36-39.
2. Милых В.И. Анализ магнитного поля в линейном электродвигателе для источников сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №2. – С.43-47.
3. Милых В.И. Математическая модель работы линейного импульсного электродвигателя для источника сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Наук.-техн. журн. "ЕЛЕКТРОІНФОРМ" Тем. вип. Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Львів: ЕКОінформ. – 2009. – С. 282-284.
4. Милых В.И. Анализ ударного режима работы линейного электродвигателя для источника сейсмических колебаний / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – №28. – С.443-445.
5. Милых В.И. Математическое обеспечение численного анализа импульсного возбуждения линейного электродвигателя с двухпараметрической функцией магнитного потокоцепления / В.И. Милых, С.В. Ткаченко // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДУ. – 2010. – Вип.3/2010(62). Частина 2. – С.70-73.